

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **06110870 A**

(43) Date of publication of application: **22 . 04 . 94**

(51) Int. Cl. **G06F 15/20**
H01L 29/00

(21) Application number: **04262285**

(71) Applicant: **TOSHIBA CORP**

(22) Date of filing: **30 . 09 . 92**

(72) Inventor: **MATSUZAWA KAZUYA**

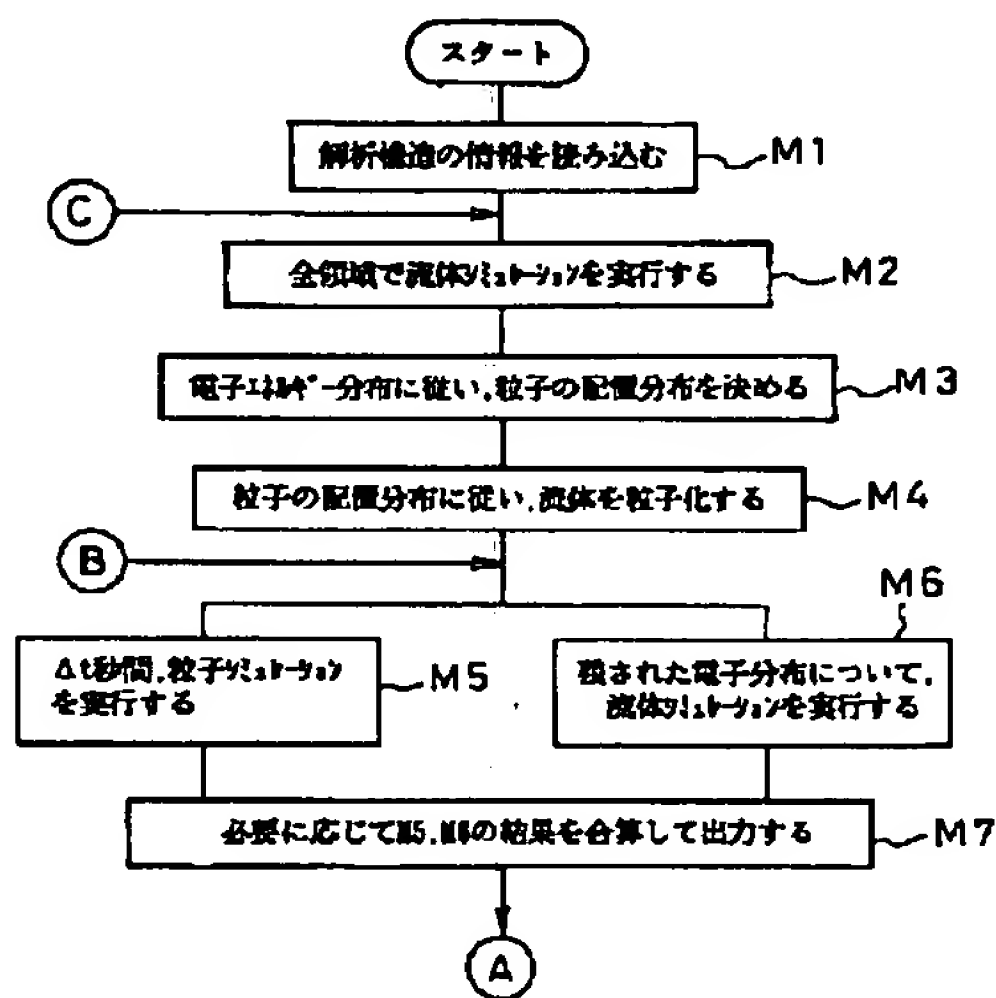
(54) SIMULATION SYSTEM

(57) Abstract:

PURPOSE: To perform physically correct characteristic analysis by converting a fluid to super-particles and analyzing transportation of the fluid, which is not converted to super-particles, by fluid simulation to eliminate unnatural distribution on the boundary between particle simulation and fluid simulation.

CONSTITUTION: Information of an analysis structure is read in a step M1, and fluid simulation is executed in all of an area in a step M2, and the arrangement distribution of particles is determined in accordance with the electron energy distribution in a step M3. The fluid is converted to super-particles in accordance with this arrangement distribution in a step M4, and particle simulation is executed for Δt seconds (10^{-13} to 10^{-4} seconds) in a step M5, and simultaneously, the distribution after Δt seconds of the electron distribution left in the analysis area is obtained by transient analysis of fluid simulation in a step M6, and results of steps M5 and M6 are added and outputted as needed in a step M7.

COPYRIGHT: (C)1994,JPO&Japio



(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-110870

(43)公開日 平成6年(1994)4月22日

(51)Int.Cl.⁵

G 0 6 F 15/20

H 0 1 L 29/00

識別記号

庁内整理番号

D 7052-5L

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数 2(全 10 頁)

(21)出願番号 特願平4-262285

(22)出願日 平成4年(1992)9月30日

(71)出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72)発明者 松澤 一也

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1 株式会
社東芝総合研究所内

(74)代理人 弁理士 三好 秀和 (外1名)

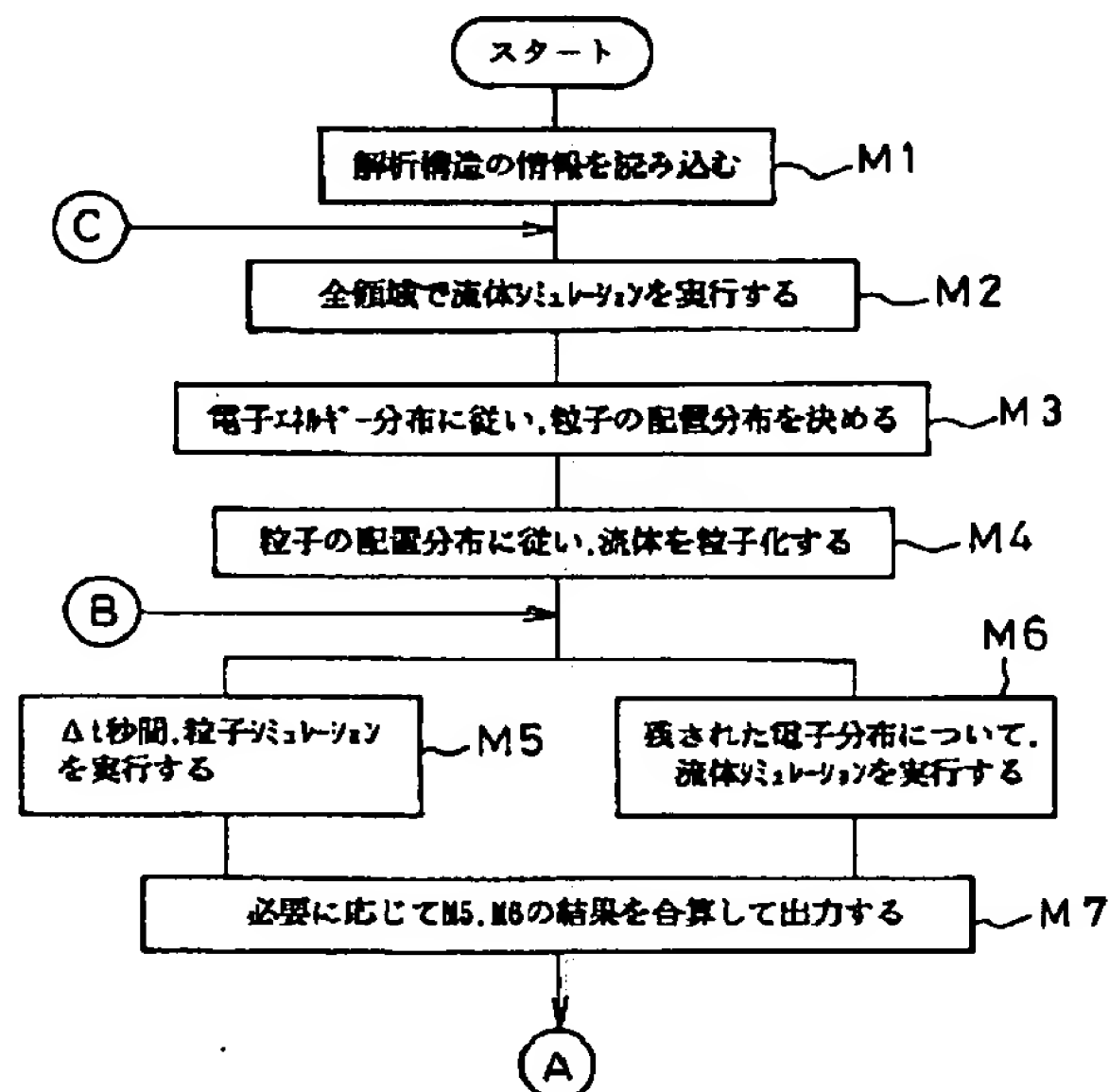
(54)【発明の名称】 シミュレーション方式

(57)【要約】

【目的】 粒子シミュレーションと流体シミュレーションとを組み合わせ、計算時間が短く、計算精度が高いシミュレーション方式を提供する。

【構成】 解析領域全体で流体シミュレーションを行い、基準となる物理量に従い、超粒子の配置分布を決める。その配置分布に従い流体を超粒子化し、粒子シミュレーションを行い、超粒子に変換されない流体の輸送を流体シミュレーションによって解析する。

【効果】 粒子シミュレーションと流体シミュレーションの境界で不自然な分布が生じる事がなく、物理的に正しい特性解析が可能である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 粒子の輸送現象を解析するために、乱数を用いて粒子を追跡するコンピュータによる粒子シミュレーション方式において、

粒子を流体とみなして解析する流体シミュレーションを行い、前記流体シミュレーションで求められた流体の濃度分布を初期値として粒子シミュレーションで用いる粒子の分布を発生する際、前記流体シミュレーションで求められた流体のエネルギー分布に従って粒子の配置分布を決定し、前記配置分布に従って前記流体シミュレーションで求められた流体の濃度分布を粒子に変換し、該変換された粒子に対して粒子シミュレーションを実行し、粒子に変換されなかった流体に対して流体シミュレーションを実行し、前記粒子の配置分布よりも多くの粒子が存在する部分について過剰な粒子を流体化し、粒子の配置分布よりも粒子数が少ない部分については不足分を流体から粒子化することを特徴とするシミュレーション方式。

【請求項2】 前記粒子の配置分布を決定する際、流体シミュレーションで求められた電界分布、または磁界分布、または速度分布、または温度分布、または流速密度分布に従って粒子の配置分布を決定することを特徴とする請求項1記載のシミュレーション方式。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、輸送特性解析方式に係り、特にコンピュータを用いて解析対象内の各物理量を数値的に求めて、特性解析を行なうシミュレーション方式に関する。

【0002】

【従来の技術】粒子の輸送現象を計算機シミュレーションで解析する場合、2つの手法がある。

【0003】1つは粒子シミュレーションと呼ばれ、解析領域内に存在する粒子を実用的な個数の仮想的な粒子（以下、超粒子と称す。）で代表させ、個々の超粒子の輸送を乱数を用いて追跡する方式である。（例えば、上村鉄夫、他著、“超粒子模型によるプラズマの計算機実験”、日本物理学会誌 第28巻 第12号 p1019, 1973）。

【0004】この手法は、場（電界、磁界など）内のドリフト、散乱といった各超粒子の素過程を少ない近似で扱えることから物理的精度は高いが、限られた数の超粒子を乱数によって動かすため、統計的に安定した物理量の分布を得るには、十分多数の超粒子を用いるか、十分長い時間超粒子を動かし、その時間平均をエルゴードの仮説に従い集合平均とする必要がある。いずれも膨大な計算時間を要する。

【0005】もう一つの手法は流体シミュレーションと呼ばれ、粒子の輸送を流体の運動として扱い、各場所ごとの物理量の平均値を微積分方程式で表現しこれを数値

的に解く手法である（例えば、S.Selberherr著、“Analysis and simulation of semiconductor devices”, Springer-Verlag, 1984）。

【0006】この手法は平均値の輸送を扱うので統計的な不安定性はなく、粒子シミュレーションよりも短時間で解が得られるが、物理量の情報が平均値しかないために、物理的に厳密な結果が得られない。

【0007】従来の粒子シミュレーションでは、計算時間を節約するために粒子シミュレーションを適用する領域を限定する手法がある（例えばF.Venturi 他著 “A general purpose of device simulation coupling poisson and Monte Carlo transport with application to deep submicron MOSFET's”, IEEE Transaction on Computer-Aided Design, Vol.8, No.8, p.360, 1989）。

【0008】図9に示す電子伝導型絶縁ゲート電界効果トランジスタ（以下、nMOSFETと称す）の特性解析を例にとる。このnMOSFETの電気的特性を支配するのは、 n^+ 拡散層4と5の間のゲート酸化膜2直下における電子の輸送特性である。

【0009】従って、破線で示された領域（以下、ウィンドウと称す）9のみに物理的に高精度な粒子シミュレーションを適用し、その他の領域には流体シミュレーションを適用すれば、経済的である。この手法は一般にウィンドウ法、あるいはハイブリッド法や領域モンテ・カルロ法と呼ばれる。

【0010】以下、ウィンドウ法の計算手順を図10のフローチャートを用いて説明する。

【0011】・まず、解析構造（図9で示した構造）の情報を読み込む（P1）。

【0012】・次に、粒子シミュレーションを適用するウィンドウの座標を読み込む（P2）。

【0013】・次に、ウィンドウ9を含む全領域で流体シミュレーションを実行する（P3）。

【0014】・次に、流体シミュレーションの結果を用いて、ウィンドウ境界での超粒子の数、流入速度などの境界条件を設定する（P4）。

【0015】・次に、流体シミュレーションの結果を用いて、ウィンドウ内に存在する電子を超粒子で代表させ、超粒子の初期状態を決める（P5）。

【0016】・次に、 Δt 秒（ 10^{-13} ～ 10^{-14} 秒）間粒子シミュレーションを実行する（P6）。

【0017】・次に、ウィンドウ外に出た超粒子を抹消し、P4で決めた境界条件を満たすように、ウィンドウ境界に新たな超粒子を配置する（P7）。

【0018】・定常状態に達したか判定する（P8）。

【0019】・定常状態に達していなければ、P7で得られた超粒子分布を用いてポアソン方程式を再計算し（P9）、P6の処理に戻る。

【0020】・定常状態に達していれば、移動度などの輸送係数を粒子シミュレーションの結果から抽出し（P

10)、全領域で流体シミュレーションを実行し(P11)、端子電流値を得る。

【0021】・必要なバイアス点を計算終了していなければ(P12)、P3の処理に戻り、計算終了していれば結果を出力する。

【0022】なお、P3、P11の流体シミュレーションの処理内容は、図11に示すように、基本方程式を連立させて、行列解法によって解くものである。また、P6の粒子シミュレーションの処理内容は、図12に示すように、各超粒子が電界によって加速される様子と、格子や不純物によって散乱される様子を乱数によって追跡するものである。

【0023】上記の処理の様子を概念図を使って以下に示す。P3の処理が終了した時、図9中のA-A'の断面における電子濃度分布は、図13のようになる。この電子濃度分布に従い、P5の処理において図14(a)のようにウィンドウ内に超粒子を発生させる。図14(b)はそのときの速度分布である。

【0024】次に、P6で Δt 秒(10^{-13} ~ 10^{-14} 秒)間粒子シミュレーションを実行した後は、図15(a)、(b)のようになる。ウィンドウ境界付近では超粒子が減少し、ウィンドウ外へ向かう大きな速度分布が生じ、不自然なものになる。これは、ウィンドウ外部から粒子の流入がないためである。次のP7の処理では、ウィンドウ境界でP4で決めた境界条件を満たすように、新たな超粒子を図16(a)、(b)のように配置するが、物理的に妥当な粒子数と速度分布となるのは境界部のみである。

【0025】電界分布を更新するために図16(a)の分布を用いてポアソン方程式を再計算するが、ウィンドウ境界付近の電界値が不自然になるのは明らかである。このウィンドウ境界付近の不自然な分布が最終的に得られる輸送特性全体に悪影響を与える。

【0026】上記のように、従来のウィンドウ法を用いて解析を行なうと、ウィンドウ境界で物理的に不自然な分布が発生し、輸送特性全体に悪影響を及ぼす問題点がある。ウィンドウ境界の問題を回避する方法としては、粒子シミュレーションの計算時間 Δt を短くし($\Delta t \sim 10^{-15}$ 秒)、ウィンドウ境界に極端に不自然な分布が生じる前に新たな超粒子を配置する方法が考えられるが、定常に達するまでの反復回数が多くなり、計算時間が増大する。また、本質的な解決にはならない。

【0027】

【発明が解決しようとする課題】このように、従来の粒子シミュレーション技術では、ウィンドウ境界で物理量の分布が不自然になり、輸送特性全体を正しく計算できないという問題点がある。

【0028】本発明は、以上の問題点を解決するために、粒子シミュレーションと流体シミュレーションとを組み合わせ、ウィンドウ境界付近で不自然な分布が生じる

ことがなく、粒子シミュレーションの特徴を生かした物理的に高精度な解析を行うことができるシミュレーション方式を提供することを目的とする。

【0029】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため、本発明は、粒子の輸送現象を解析するために、乱数を用いて粒子を追跡するコンピュータによる粒子シミュレーション方式において、粒子を流体とみなして解析する流体シミュレーションを行い、前記流体シミュレーションで求められた流体の濃度分布を初期値として粒子シミュレーションで用いる粒子の分布を発生する際、前記流体シミュレーションで求められた流体のエネルギー分布に従って粒子の配置分布を決定し、前記配置分布に従って前記流体シミュレーションで求められた流体の濃度分布を粒子に変換し、該変換された粒子に対して粒子シミュレーションを実行し、粒子に変換されなかった流体に対して流体シミュレーションを実行し、前記粒子の配置分布よりも多くの粒子が存在する部分について過剰な粒子を流体化し、粒子の配置分布よりも粒子数が少ない部分については不足分を流体から粒子化することを特徴としている。

【0030】また、本発明は、前記粒子の配置分布を決定する際、流体シミュレーションで求められた電界分布、または磁界分布、または速度分布、または温度分布、または流速密度分布に従って粒子の配置分布を決定しても良い。

【0031】

【作用】上記手段により、本発明は、解析領域全体で流体シミュレーションを行い、基準となる物理量に従い、超粒子の配置分布を決める。その配置分布に従い流体を超粒子化し、粒子シミュレーションを行い、超粒子に変換されない流体の輸送を流体シミュレーションによって解析する。

【0032】このようにすることにより、粒子シミュレーションと流体シミュレーションの境界で不自然に分布が生じる事がなく、物理的に正しい特性解析が可能である。

【0033】

【実施例】以下に、本発明の実施例を説明する。

【0034】例えばnMOSFET内部における電子の輸送現象を解析する例を示す。図1、2は具体的なフローチャートである。

【0035】・まず、解析構造の情報を読み込む(M1)。

【0036】・次に、全領域で流体シミュレーションを実行する(M2)。

【0037】・次に、粒子の配置分布を決める(M3)。粒子の配置分布は、例えば、流体シミュレーションから求めた電子エネルギー分布に従って決める。即ち、電子エネルギーが高い領域では、一般に物理的精度

が要求されるので、多くの粒子を配置する。具体的には、電子エネルギーに比例して超粒子を発生させる。

【0038】なお、粒子の配置分布は、電子エネルギーの指数関数や対数関数に比例して決めてもよい。また、粒子の配置分布は、電界分布、磁界分布、速度分布、温度分布、または流速密度分布に従って決めてもよい。

【0039】・配置分布に従い、流体を超粒子化する(M4)。

【0040】・次に、 Δt 秒(10^{-11} ~ 10^{-14} 秒)間粒子シミュレーションを実行する(M5)。

【0041】・これと同時に、解析領域内に残された電子分布の Δt 秒後の分布を流体シミュレーションの過渡解析によって求める(M6)。

【0042】・必要に応じて、M5、M6の結果を足し合わせ出力する(M7)。

【0043】・定常状態に達したか判定する(M8)
・定常状態に達していなければ、粒子の配置分布よりも多くの粒子が存在する部分について過剰な粒子を流体化する(M9)。また、粒子の配置分布よりも粒子数が少ない部分について、不足分を流体から粒子化する(M10)。M9、M10の結果を足し合わせ、この電子濃度分布を用いてポアソン方程式を再計算し電界分布を更新して、M5、M6の処理に戻る(M11)。

【0044】・定常状態に達していれば、移動度などの輸送係数を粒子シミュレーションの結果から抽出し(M12)、全領域で流体シミュレーションを実行し(M13)、端子電流値を得る。

【0045】・必要なバイアス点を計算終了したか判定する(M14)。

【0046】・必要なバイアス点を計算終了していなければ、M2の処理に戻り、計算終了していれば結果を出力する。

【0047】なお、M5の粒子シミュレーションの処理内容は、図12に示したものと同様であり、M6の流体シミュレーションの処理内容は、図11に示したものと同様である。

【0048】以上の処理の様子を図3の中A-A'の断面でみたときの超粒子、および流体の動きによって説明する。

【0049】・M2の結果、図4のような電子濃度分布と電子エネルギー分布が得られる。

【0050】・M3で決められた粒子の配置法に従いM4が実行されると、電子濃度分布が図5(a)、(b)のように超粒子と流体の分布に分けられる。

【0051】・M5、M6の結果、 Δt 秒後の超粒子と流体の分布は図6(a)、(b)のように変化する。

【0052】・M9では、図5(a)で示した粒子の配置分布よりも多くの粒子が存在する部分について過剰な粒子を流体化し、M10では、図5(a)で示した粒子の配置分布よりも粒子数が少ない部分について、不足分

を流体から粒子化する。

【0053】・そして、図7(a)、(b)のように再分配された超粒子と流体を、再び、M5、M6で Δt 秒計算する。

【0054】図8は、図3中のA-A'の断面における電子濃度分布と速度分布について、図1のような処理を用いる本発明による結果と、図10に示したような従来手法による結果を比較したものである。

【0055】図8(a)は、電子濃度分布の比較で、図8(b)は、電子速度分布の比較である。実線が本発明、破線が従来手法の結果である。本発明では、不自然な分布が生じないことがわかる。従って、従来法のようにウィンドウ境界付近の不自然な分布が輸送特性全体に悪影響する事もない。

【0056】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば複数の粒子の輸送特性を解析する粒子シミュレーションにおいて、ウィンドウ境界付近で不自然な分布が生じることがなく、粒子シミュレーションの特徴を生かした物理的に高精度な解析が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例による計算手順を示すフローチャートを示す図。

【図2】図1に続く本発明の一実施例による計算手順を示すフローチャートを示す図。

【図3】実施例におけるnMOSFETの断面図。

【図4】図3中のA-A'断面図における電子濃度分布と電子エネルギー分布を示す図。

【図5】実施例における粒子の配置分布に従って配置された超粒子の分布と、超粒子に配置されなかった流体の分布を示す図。

【図6】図5の超粒子と流体の分布を Δt 秒間シミュレーションした結果を示す図。

【図7】実施例における粒子の配置分布に従って再配置された超粒子と流体の分布を示す図。

【図8】実施例によって求められた電子濃度分布と電子速度分布を従来技術と比較した図。

【図9】従来法におけるnMOSFETの断面とウィンドウの座標を示す図。

【図10】従来法による計算手順を示すフローチャートを示す図。

【図11】流体シミュレーション手法の概要を示す図。

【図12】粒子シミュレーション手法の概要を示す図。

【図13】図9のA-A'断面図における電子濃度分布を示す図。

【図14】従来法におけるウィンドウ内に配置された超粒子の分布と速度分布を示す図。

【図15】図14の超粒子の分布を Δt 秒間シミュレーションした結果を示す図。

【図16】従来法におけるウィンドウ境界部に新たな超

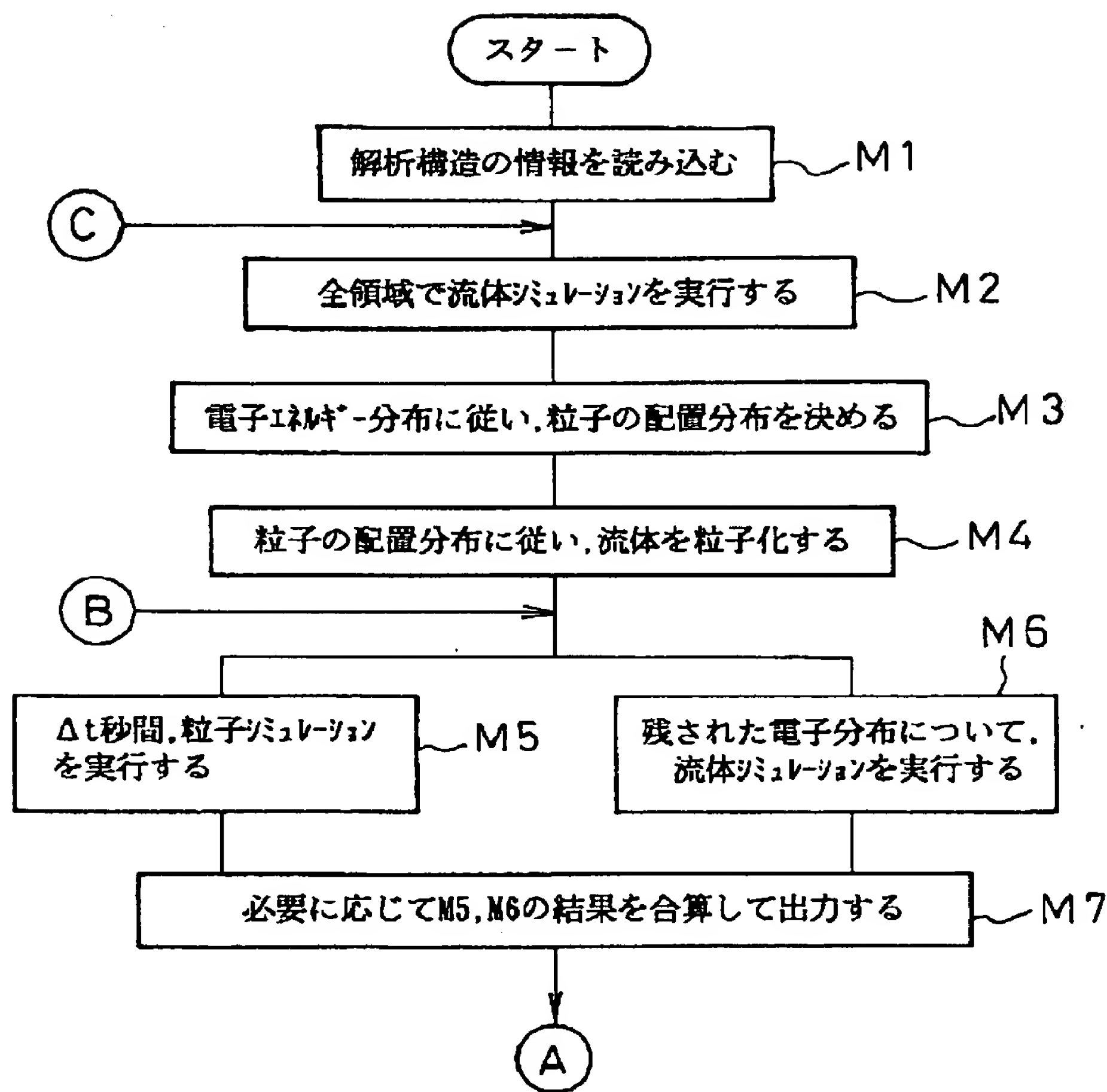
7
粒子を配置した結果を示す図。

【符号の説明】

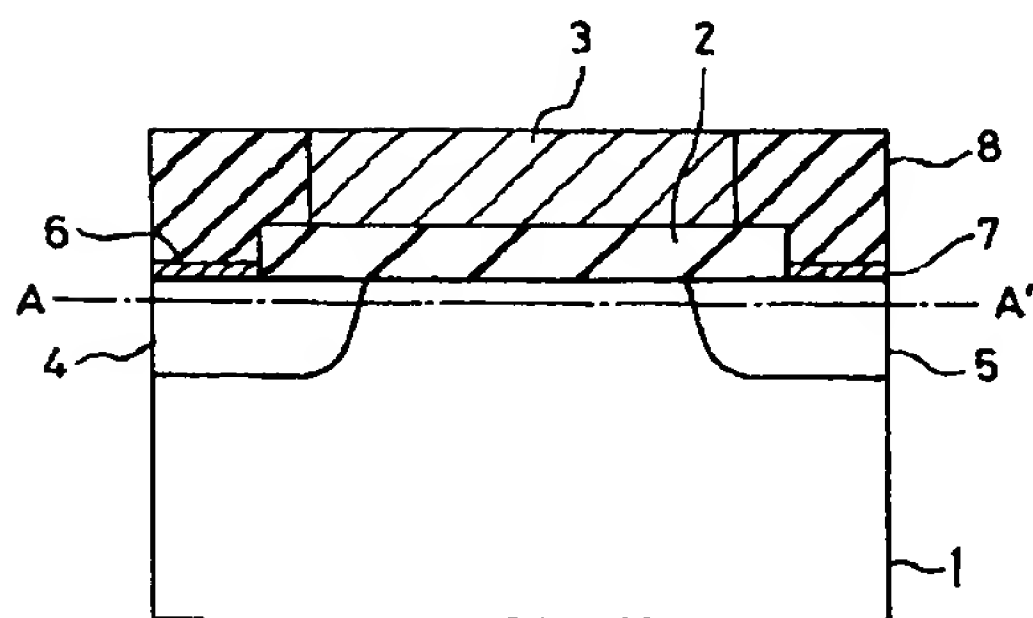
- 1 p型シリコン基板
2 ゲート酸化膜
3 ゲート電極

- * 4 ソースn⁺拡散層
5 ドレインn⁺拡散層
6 ソース電極
7 ドレイン電極
* 8 保護酸化膜

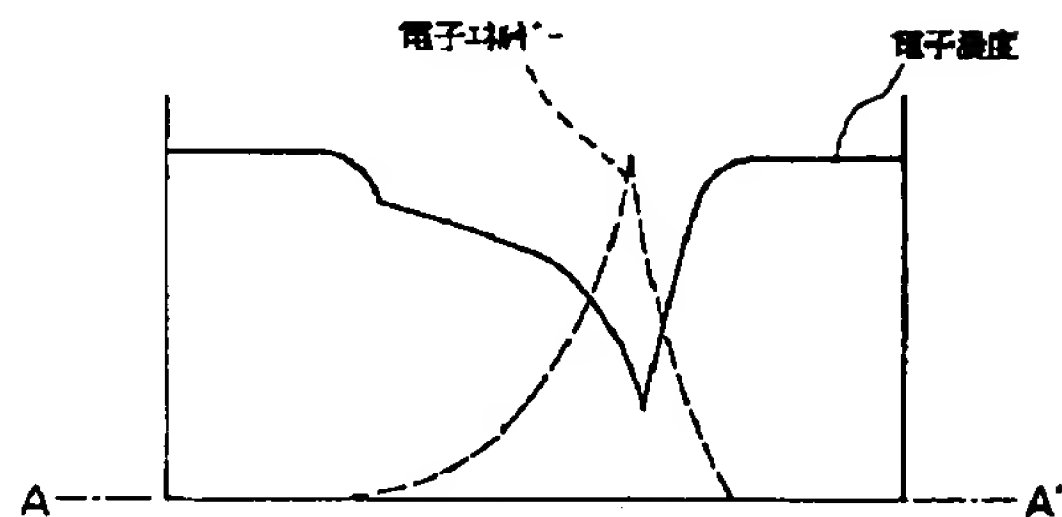
【図1】



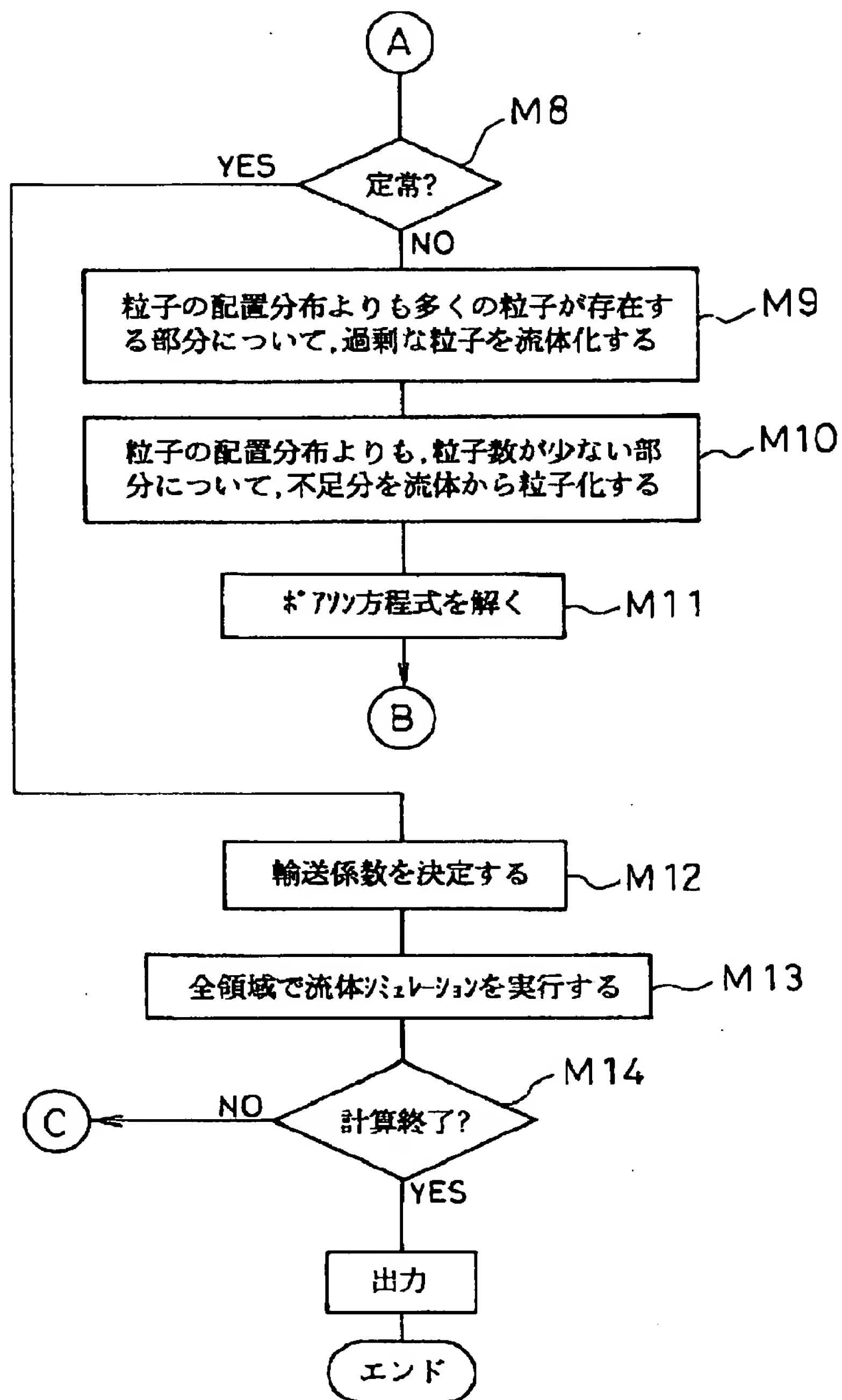
【図3】



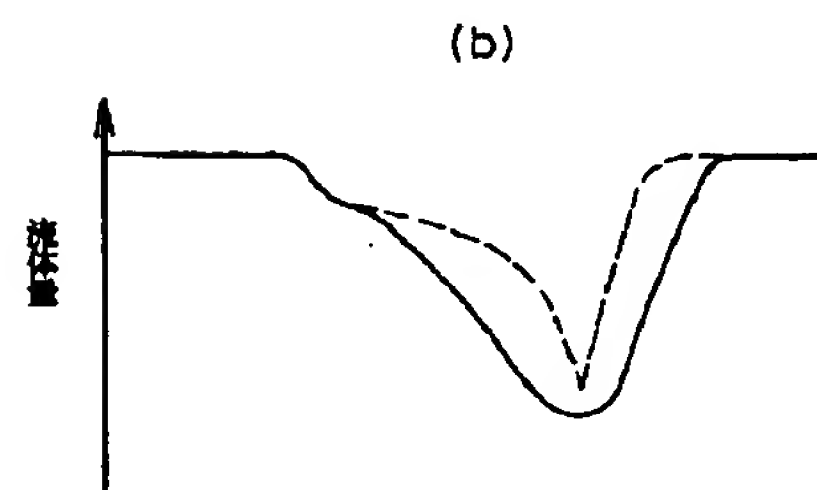
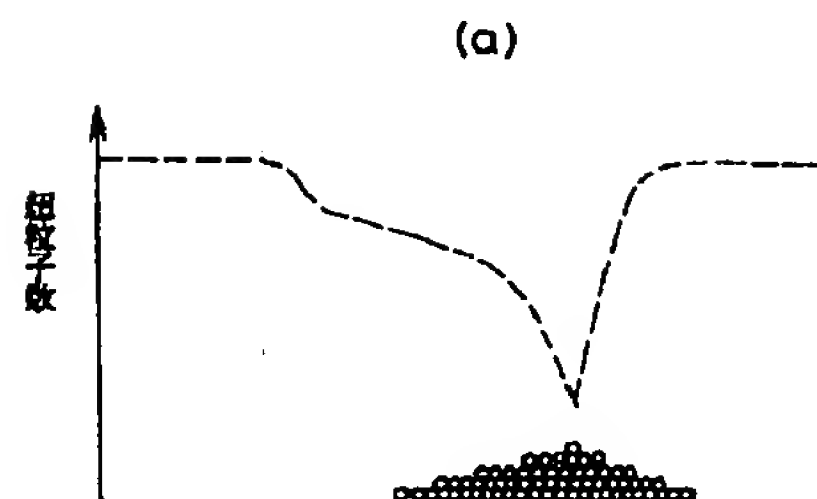
【図4】



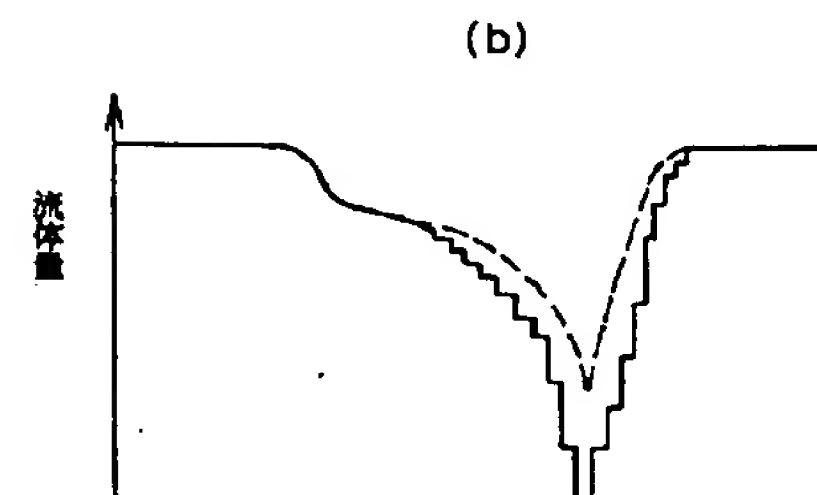
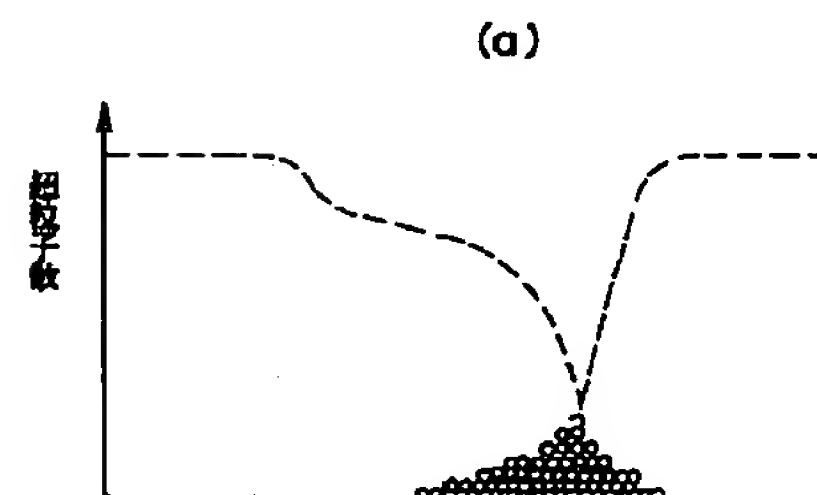
【図2】



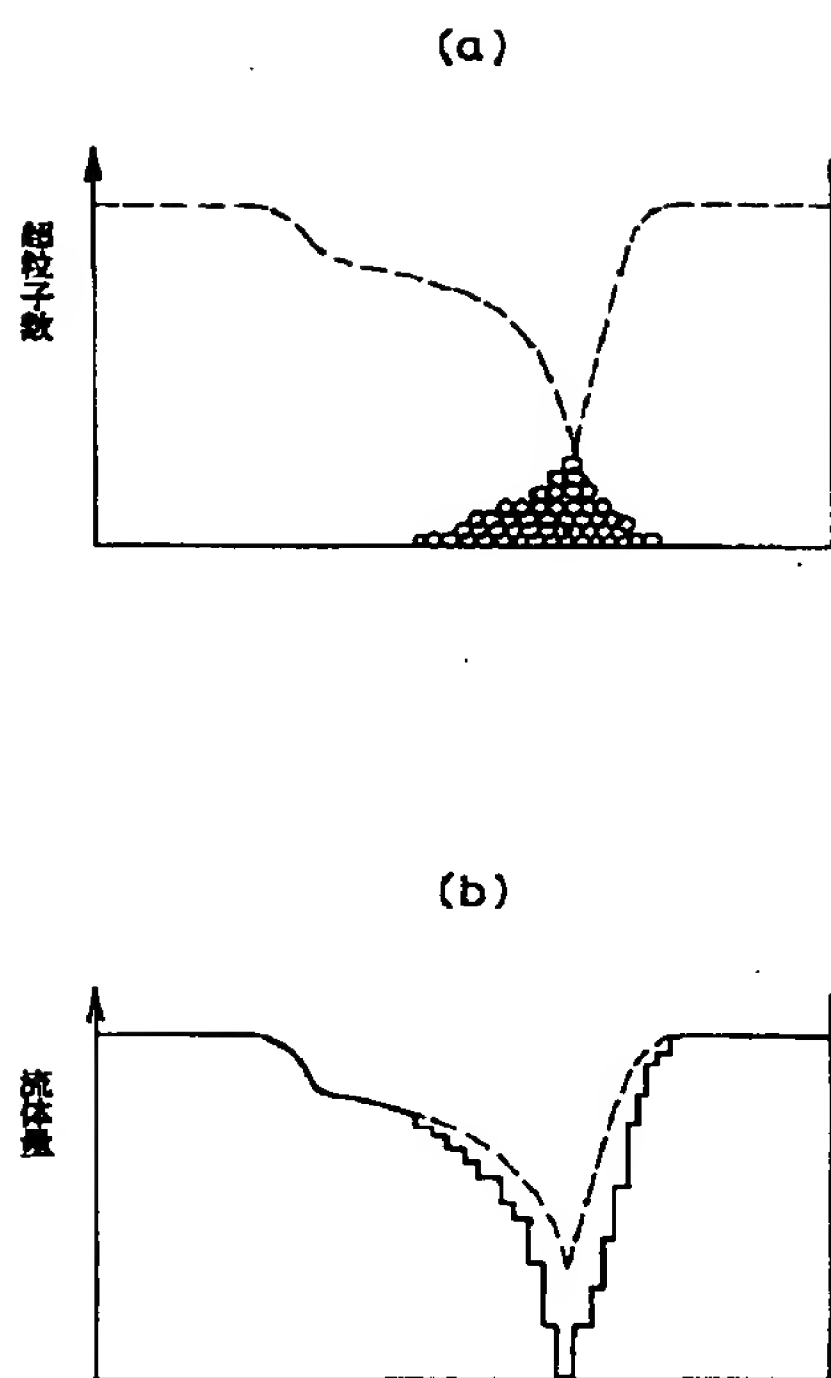
【図6】



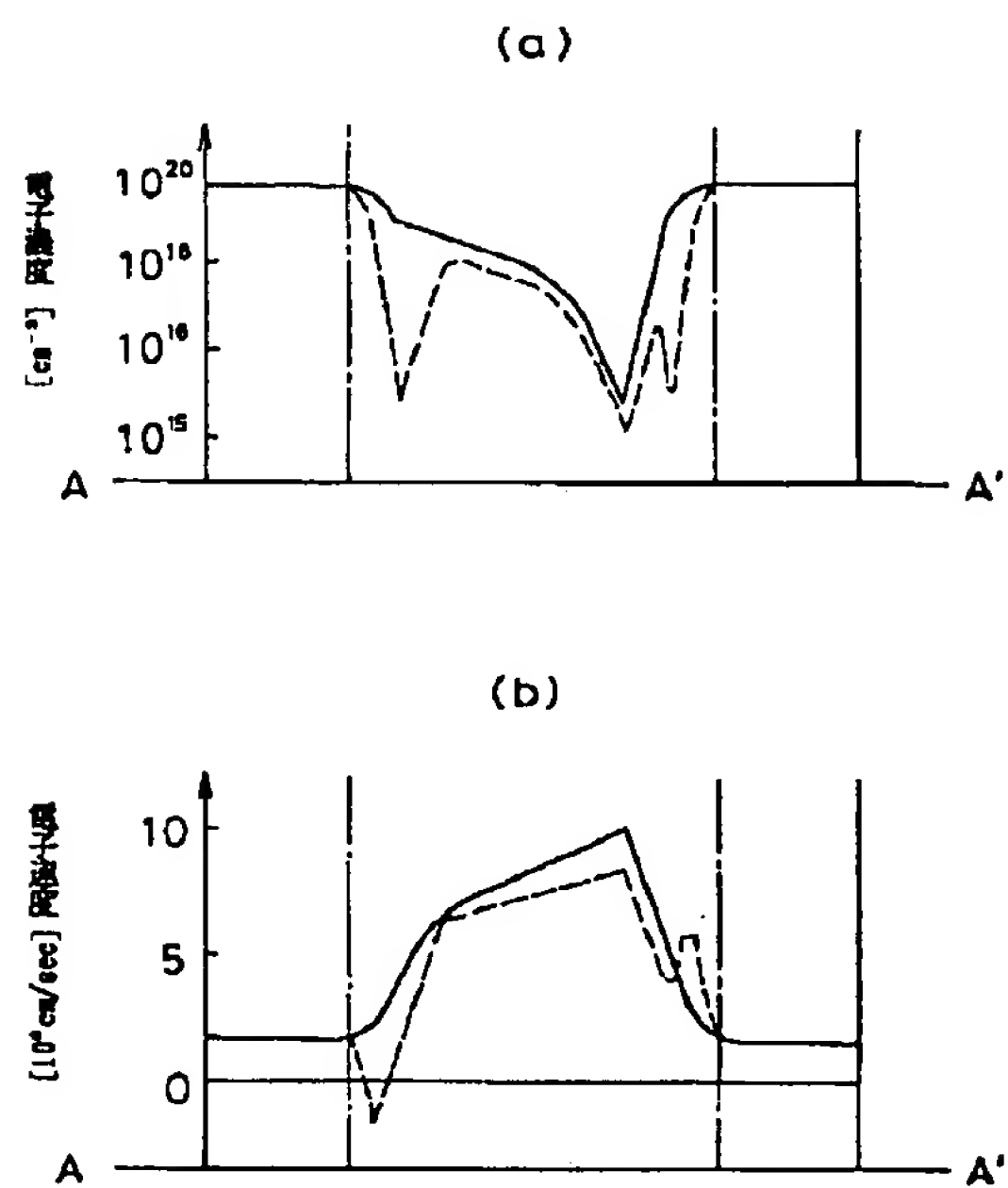
【図7】



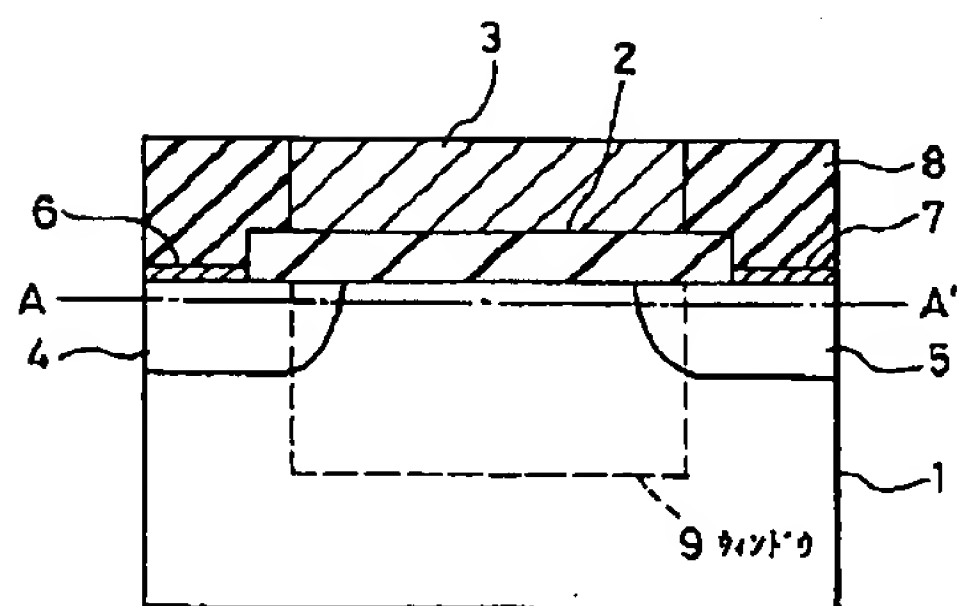
【図5】



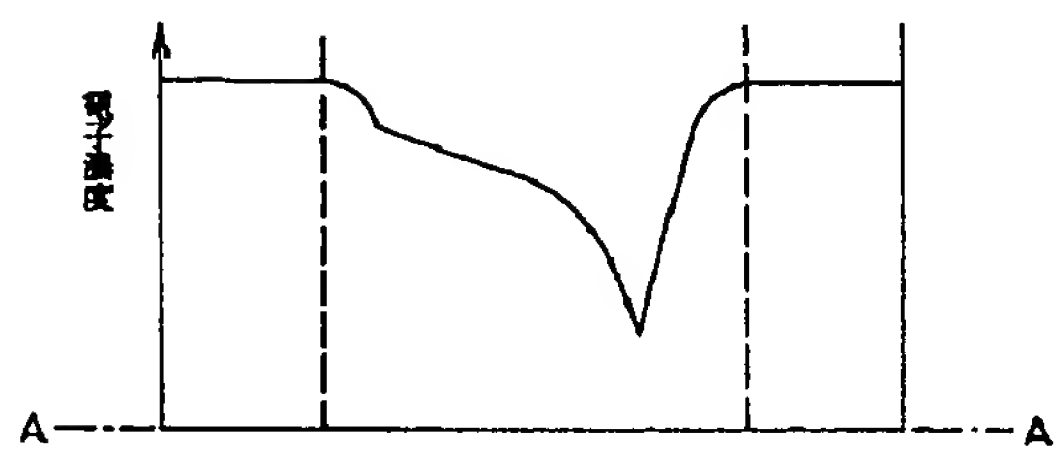
【図8】



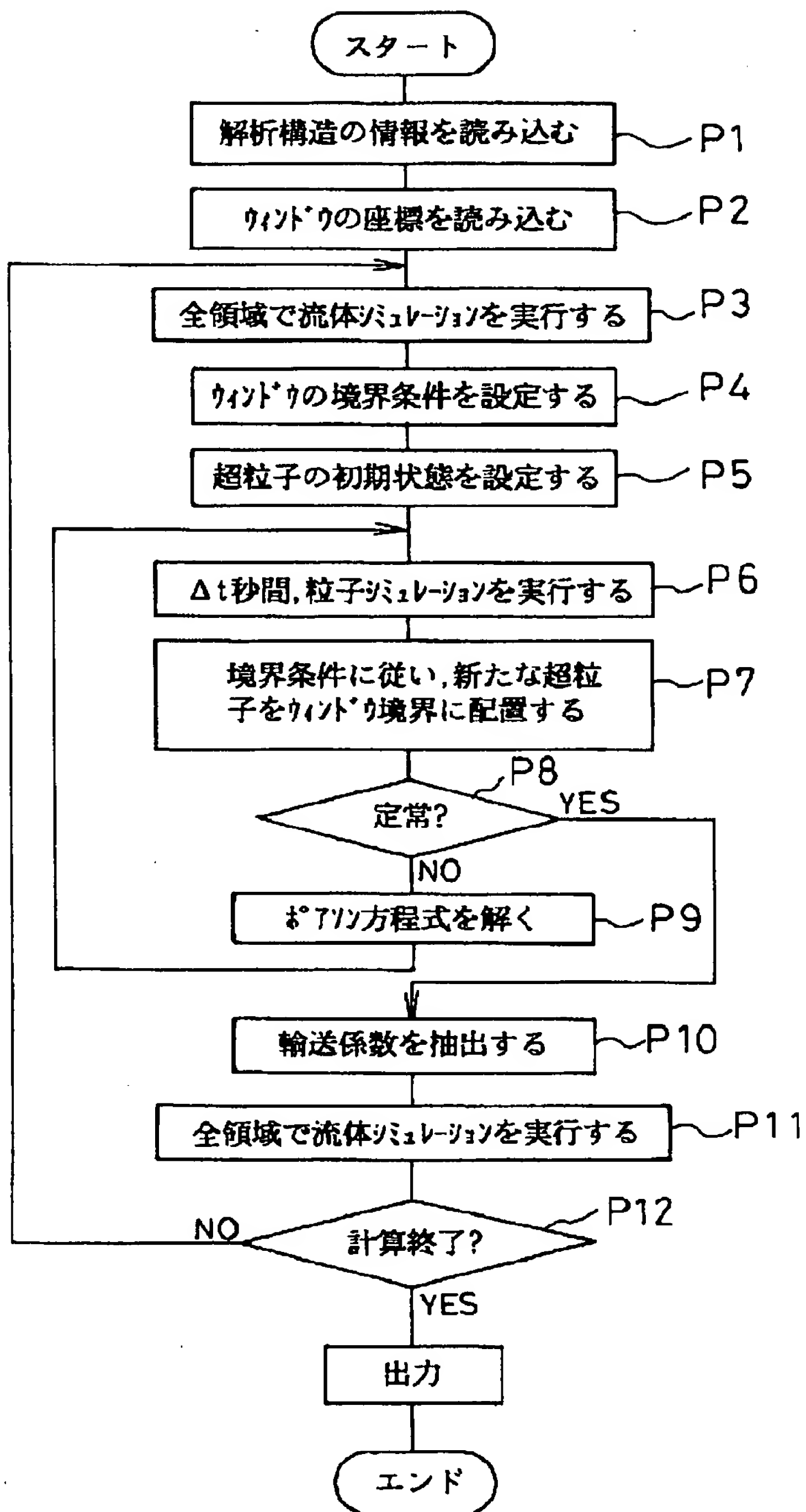
【図9】



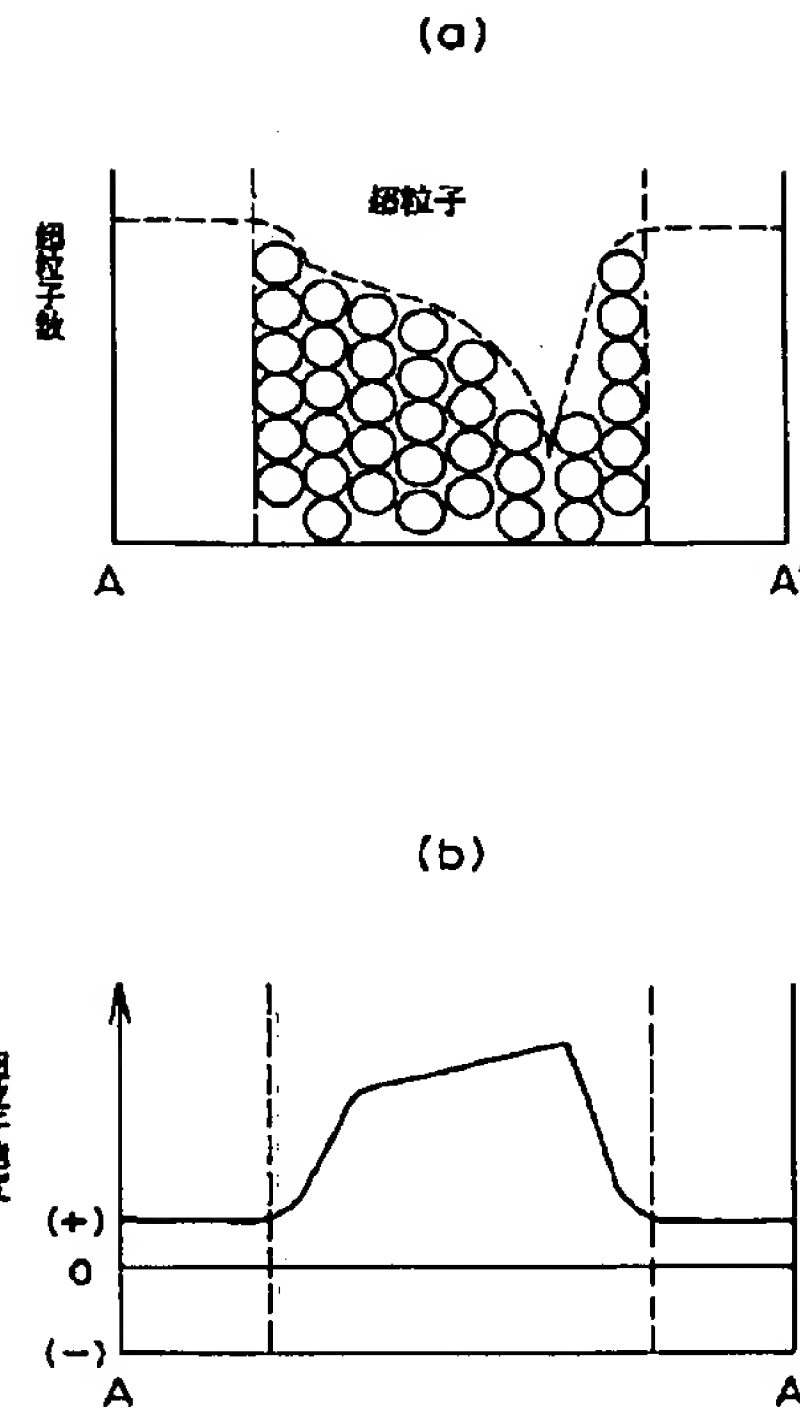
【図13】



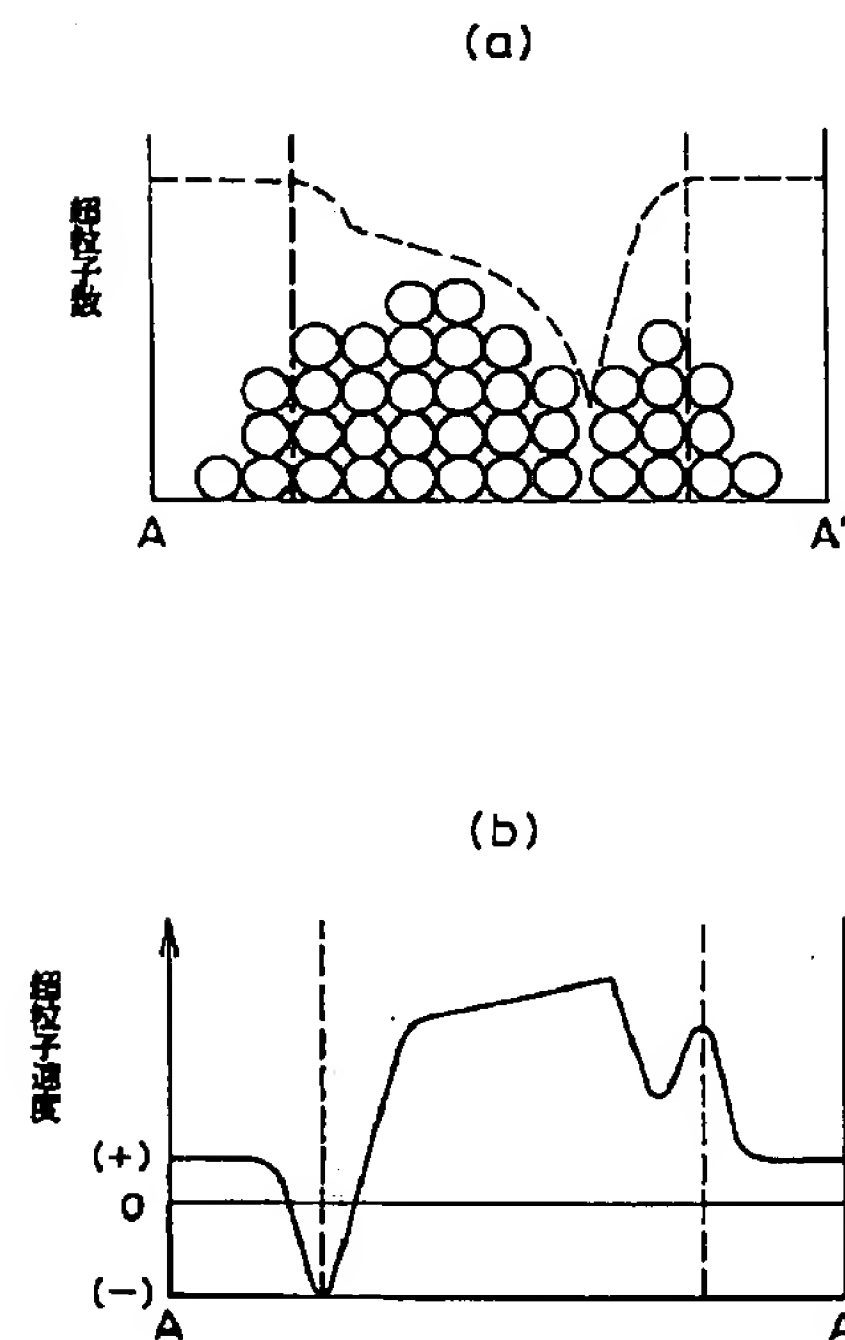
【図10】



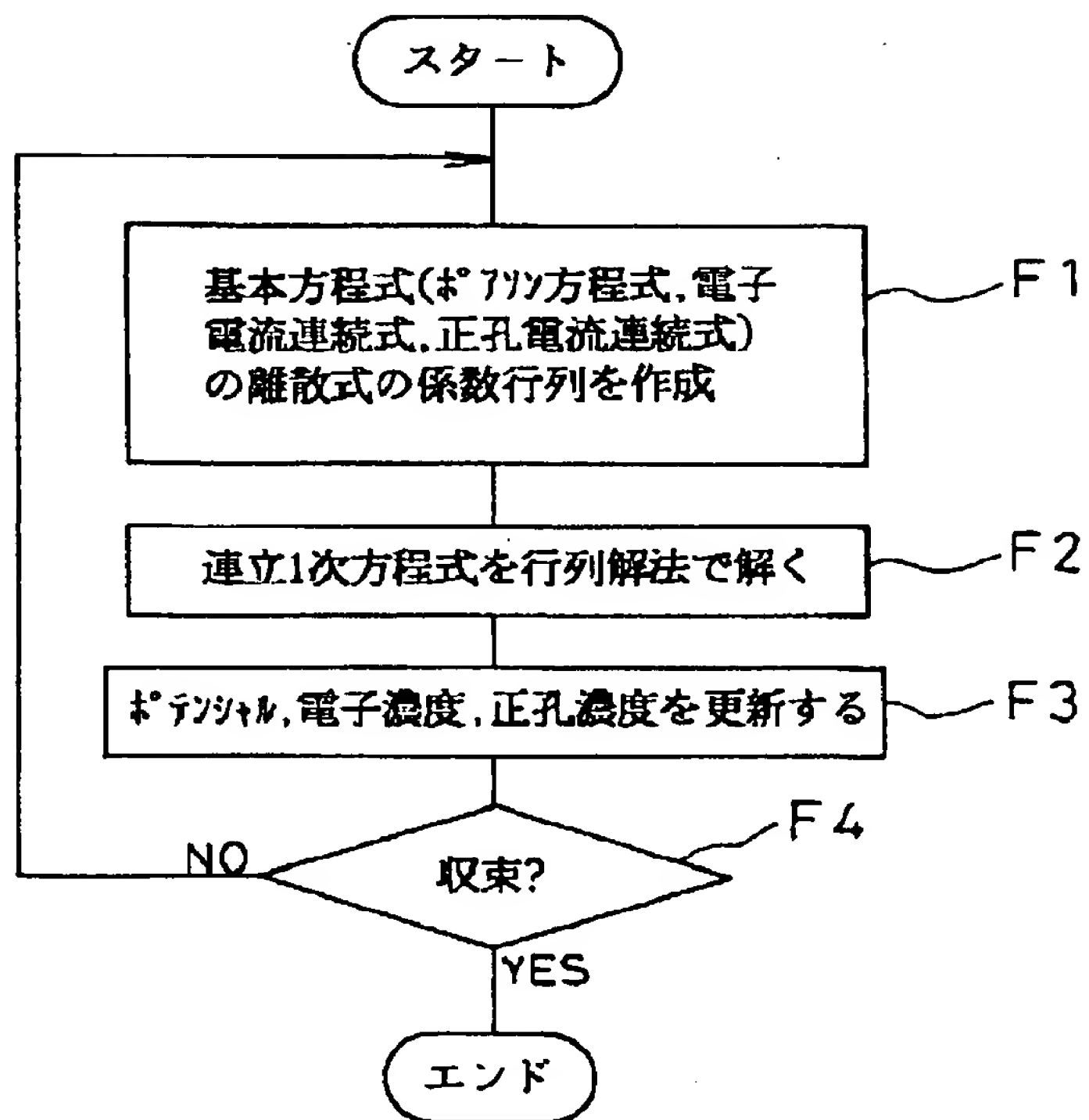
【図14】



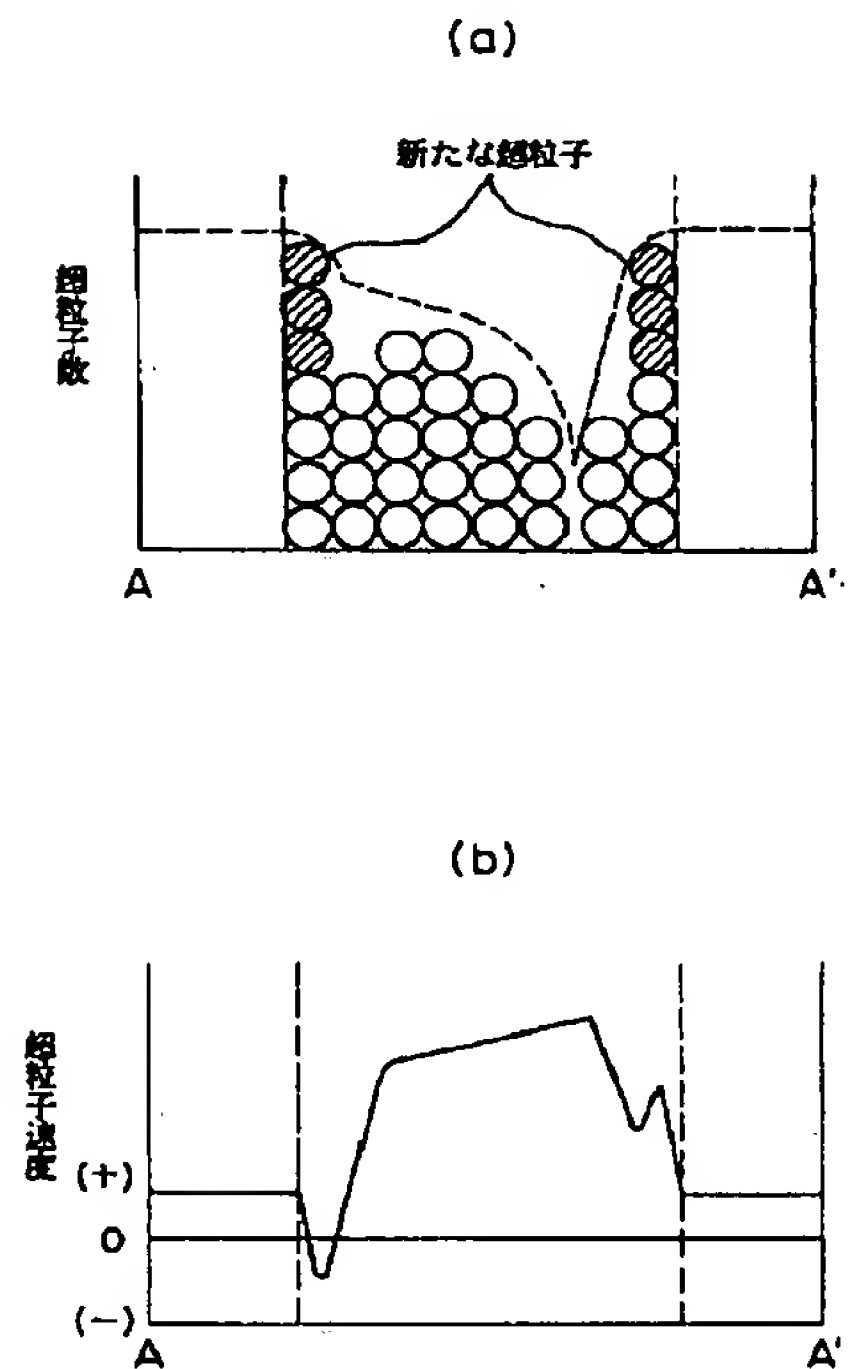
【図15】



【図11】



【図16】



【図12】

